



Akustisen melun vähentäminen vastamelutekniikkaa käyttäen

Sampo Metsäranta

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2020

Tieto- ja viestintätekniikka
Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tieto- ja viestintätekniikka
Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot

METSÄRANTA, SAMPO:

Akustisen melun vähentäminen vastamelutekniikkaa käyttäen

Opinnäytetyö 31 sivua, joista liitteitä 3 sivua
Toukokuu 2020

Tämän opinnäytetyön aiheena on tutkia vastamelutekniikan käyttömahdollisuuksia akustisen melun vähentäjänä. Ideaa tarkastellaan kaksikanavakuuntelun näkökulmasta. Työssä esitellään myös akustisia ilmiöitä ja miten esimerkiksi akustiikkapaneelit tai digitaalinen huonekorjaus voi auttaa akustisten ongelmien kanssa.

Nykyään on monia tapoja akustoida huone halutulle tasolle. Yleinen passiivinen tapa, eli absorboivien materiaalien sijoittelu huoneen pinnoille tai äänen levittäminen pienempiin osiin diffuuserin avulla, saa huoneen kuulostamaan huomattavasti paremmalta. Digitaalisella huonekorjauksella voidaan saavuttaa hyviä tuloksia jopa ilman fyysistä akustointia. Huonekorjaus tekee amplitudi- ja viivemuutoksia, jotka parantavat ääntä entisestään, vaikka tila olisikin jo passiivisesti akustoitettu.

Ideana on käyttää erillisiä kaiuttimia, jotka tuottavat akustiikan tuomien vääristyksien ääntä, mutta vaiheen ollessa 180° kuultavaan akustiikan tuomaan ääneen. Teoriassa tällä tavalla saadaan vähennettyä amplitudivääristymiä ja tasoitettua amplitudivastetta.

Normaalit akustointitavat ja sovellukset eivät pysty poistamaan kaikkia akustisia ongelmia. Vastamelutekniikkaa hyödyntävä järjestelmä pystyy teoriassa viemään akustoinnin seuraavalle tasolle hyödyntämällä kaikkia akustamisen osa-alueita. Tekniikka toimii, mutta se ei ole vielä käyttäjäystävällisellä tasolla ja sitä pitää kehittää kustannustehokkaammaksi.

Asiasanat: akustinen melu, vastamelu, huonekorjaus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in ICT Engineering
Telecommunications and Networks

METSÄRANTA, SAMPO:
Using Noise Cancelling Technology to Reduce Acoustic Noise

Bachelor's thesis 31 pages, appendices 3 pages
May 2020

The purpose of this thesis was to study possibilities to reduce acoustic noise using noise cancelling technology. The idea is viewed from the perspective of two-channel listening. The thesis also discusses general knowledge of acoustic phenomena and information about normal passive acoustic treatments and digital signal processing in a room correction format.

There are many ways to treat room to specific level. Passive usual way is to install absorbing panels to room's surfaces or to use acoustic diffuser to spread sound evenly across a room to achieve better sound. Digital room correction makes amplitude and time domain changes to improve sound in an acoustically difficult room, even with great success without physical room treatment.

The idea is to use additional speakers that produce undesired acoustic resonances but out of phase. This way additional speakers can reduce amplitude distortion and flatten amplitude curve.

Usual acoustic treatments and software cannot address some acoustic problems. Noise cancelling speaker system can bring acoustic treatments to the next era by taking advantage of all aspects in acoustic treatments.

The result of the thesis depicts that acoustic noise cancellation technology is only doable if this technology is developed to be user friendly. Now it is only an idea of more effective way to handle acoustic problems. The end results were two-fold. The technology works but it is not yet cost effective.

Key words: acoustic noise, noise cancelling, room correction

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	AKUSTIIKKA.....	7
2.1	Ääni.....	7
2.2	Teoria ja käsitteet.....	7
2.3	Akustiikan havainnointi.....	9
2.4	Akustoinnin normaalit tavat	11
2.4.1	Passiivinen	11
2.4.2	Digitaalinen huonekorjaus	11
3	AKTIIVINEN VASTAMELUTEKNIikka.....	13
3.1	Teoria.....	13
3.2	Mikrofonien sijoittelu.....	13
3.3	Käyttökohteet	14
4	KAIUTTIMIEN KÄYTTÖ AKUSTIIKASSA	15
4.1	Idea	15
4.2	Käytännön kokeilu	16
4.3	MiniDSP 2x4:n käyttö aktiivisena vastamelu prosessorina	19
4.4	FIR ja IIR -suotimet	22
4.5	Tulosten vertailu.....	25
5	POHDINTA	26
	LÄHTEET.....	27
	LIITTEET	29
	Liite 1. Kaiuttimien normaalit taajuusvasteet.....	29
	Liite 2. 180 asteen käännön mittaus	30
	Liite 3. MiniDSP:llä tehty 180 asteen mittaus.....	31

ERITYISSANASTO

Alipäästösuodatin	Suodattaa esim. 500 Hz:n yli menevät taajuudet
Amplitudivaste	Amplitudi/äänenpaine suhteessa taajuuteen
DSP	Digitaalinen signaali prosessori
FIR-suodin	Takaisinkytkemätön digitaalinen suodin
IIR-suodin	Takaisinkytketty digitaalinen suodin
Invert	Signaalin napaisuuden kääntö
LR	Linkwitz–Riley, suodatustapa
Oktaavi	Taajuuden kaksinkertaistuminen
Painoitus	Tapa mitata
Parametrinen suodin	Amplituditason suodin, joka käyttää Q-arvoa
Q	Hyvyysluku
RCA-johto	Audiolaitteiden yhdistämisjohto
REW	Huoneakustiikan mittaus -sovellus
SPL	Vertaa äänenpainetta esim. referenssiin
Taajuusvaste	Katso amplitudivaste
Tap	"taps" eli DSP:n laskentatehon yksikkö
Tehollisarvo	Neliöllinen keskiarvo, jatkuva teho
Terssi	Oktaavin kolmasosa
rePhase	FIR-suotimien suunnittelu -sovellus
Vaihevaste	Vaihe suhteessa taajuuteen
Ylipäästösuodatin	Suodattaa esim. 500 Hz:n ali menevät taajuudet

1 JOHDANTO

Tapoja parantaa akustiikkaa on nykyään monia ja niitä käyttämällä päästään jo erittäin hyvään tulokseen. On kuitenkin asioita, joita nykyteknologialla ei voida poistaa. Esimerkiksi seisovat aallot aiheuttavat suuria amplitudivääristymiä, jotka ovat erittäin hyvin havaittavissa.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan, miten vastamelutekniikkaa voitaisiin hyödyntää akustisten ongelmien kanssa kaksikanavakuuntelussa. Työssä perehdytään akustisiin ongelmiin ja siihen, miten niitä voidaan ratkoa perinteisin passiivisin keinoin asentamalla akustiikkapaneeleja tai fyysisesti muokkaamalla huoneen rajoja. Lisäksi perehdytään digitaalisten huonekorjaukseen, sen hyviin ja huonoihin puoliin. Työssä käsitellään ihmisen kuuloaistin ominaisuuksia ja miten akustiikan tuomat väritymät havaitaan ja miten niitä yritetään mallintaa mittauksissa ja korjauksissa. Teoriaosuus päätetään aktiivisen vastamelutekniikan esittelyyn ja sen käyttökohteisiin.

Teoriaosuuden jälkeen esitellään idea, miten vastamelutekniikasta saadaan apua ratkaisemaan huoneen akustisia ongelmia. Lisäksi perehdytään digitaalisten suotimien käyttöön ja niiden ominaisuuksiin. Lopuksi tehdään mittauksia ja esitellään lopputulokset ja kehitystapoja.

2 AKUSTIIKKA

2.1 Ääni

Ääni on aaltoliikettä, joka leviää aina väliaineen kautta. Ääni etenee kaasuissa pitkittäisenä aaltoliikkeenä, eli paineen tiheytyminä ja harventumina. Kiinteissä aineissa ääni voi myös esiintyä poikittaisena aaltoliikkeenä, joka voidaan havainnoida kiinteän aineen värähtelynä kohtisuorassa kappaleeseen nähden. Paineiden tiheytymien suuruutta kuvaa amplitudi, joka vaikuttaa kuultavan äänen suuruuteen.

Äänenpaine tai akustinen paine on äänenvoimakkuuden suure, jonka yksikkö on Pascal (Pa). Äänenpaine on ääniaaltojen tuottaman paineen ja staattisen paineen erotus. Äänenpainetaso on kahden tehollisarvoisen äänenpaineen suhde logaritmisella asteikolla, yksikkönä desibeli (dB). Desibeli vertaa kahden suureen suhdetta, esimerkiksi hetkellistä äänenpainetta referenssiin tai kuulokynnykseen (Äänenpaine ja äänenpainetaso 2017.) Kun aaltoliikkeen tiheytymät ohittavat tietyn kiinnitetyn paikan sekunnissa, sitä kutsutaan taajuudeksi (Hz).

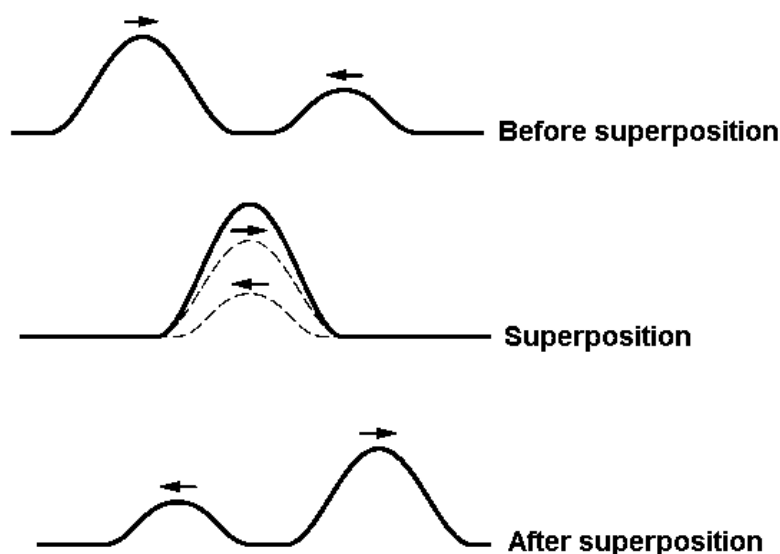
Paineaaltojen saapumista tiettyyn pisteeseen eri pituisin viivein kutsutaan vaiheeroksi. Eri taajuuksien väliset pituudet aika-akselilla saapuvat siis hieman eri tahdissa toisiin taajuuksiin nähden. Kun koko taajuuskaista tulee myöhässä, sitä kutsutaan viiveeksi. Viive lisää kaikkien taajuuksien vaihetta saman verran, eikä vaikuta eri taajuuksien välisiin viiveisiin.

2.2 Teoria ja käsitteet

Akustiikka on väritymää äänen alkuperäisestä lähteestä. Täydellinen akustiikka olisi usein akustisen melun olemattomuutta, sillä usein väritymiä ja vääristymiä pyritään poistamaan. Ne tulevat huoneen rakenteellisista ratkaisuista ja sen sisällöstä. Ääniaaltojen osuessa tilan rakenteisiin sen eri materiaalit reagoivat erilaisin tavoin. Jos äänilähteitä on useampia, ääniaallot voivat törmätä toisiinsa en-

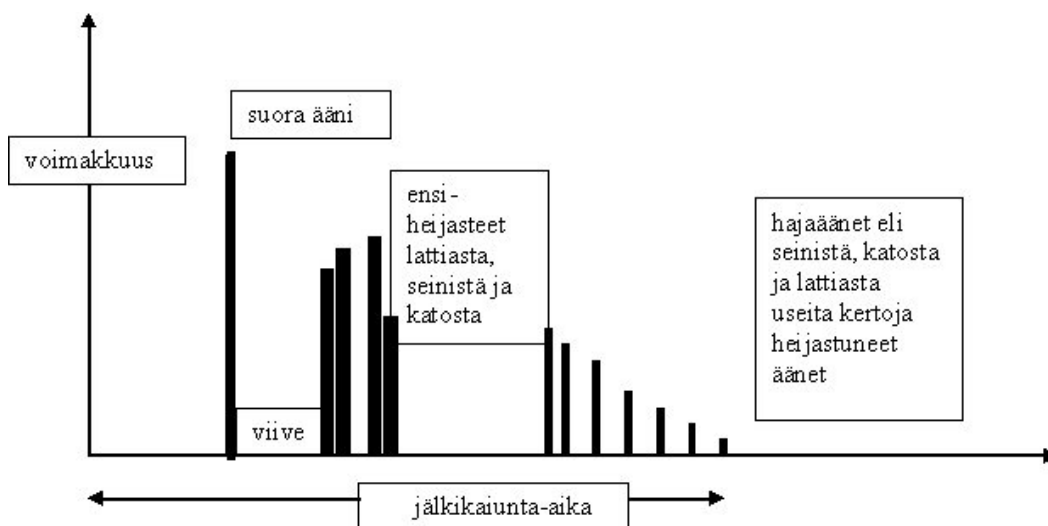
nen tilan vaikutusta. Tätä kutsutaan interferenssiksi. Kun kaksi tai useampi saman taajuista aaltoa törmää toisiinsa, ne vaikuttavat toisiinsa summaavasti tai vähentävästi. Tätä kutsutaan superpositioperiaatteen (kuvio 1). Ääniaallon kimpoamista äkillisesti kiinteästä aineesta kutsutaan heijastukseksi. Heijastuessaan siniaallosta voi syntyä seisova aalto, kun kaksi saman taajuista siniaaltoa osuvat päällekkäin mutta toisen aallon vaihe on kääntynyt 180° . Seisovassa aallossa on solmuja, jossa partikkelit ovat paikoillaan ja ääntä ei juuri kuulu, tätä kutsutaan destruktiiviseksi interferenssiksi. Vastakohta solmuille on kuvut, jossa partikkelit ovat maksimaalisessa rasituksessa. Hiukkaset ovat liikkeessä ja ääni kuuluu korostettuna. Tätä kutsutaan konstruktiviseksi interferenssiksi. (Nave R, Standing Waves n.d..)

Seisovien aaltojen voimakkuus on riippuvainen seinä- ja lattiapintojen materiaalista. Järeät betonipinnat heijastavat ääntä voimakkaammin, kuin kevyet, esimerkiksi puurakenteiset seinät. Tämän johdosta seisovien aaltojen vaikutus äänentoistoon on suurempi kerrostalossa kuin esimerkiksi puurakenteisessa omakotitalossa. Seisovat aallot huoneessa voidaan laskea seuraavalla kaavalla: $344: (2 \times m)$, jossa m on huoneen korkeus, leveys tai pituus. Esim. huoneen mitat ovat, pituus 5m, korkeus 3m ja leveys 4 m. Huoneen pituussuunnassa seisovat aallot sijaitsevat taajuudella 34 hertsiä ($344: (5 \times 2)$). Lisäksi samansuuntaiset heijastumat sijaitsevat taajuuksilla 68, 102, 136 jne. Korkeussuunnassa seisova aaltoja esiintyy taajuuksilla 57, 114, 171 jne. Sekä leveyssuunnassa taajuuksilla 43, 86, 129 jne. (Mitä ääni on?, OR-LOUDSPEAKERS n.d.)



KUVIO 1. Superpositioperiaate (Principle of Superposition of Wave n.d., muokattu)

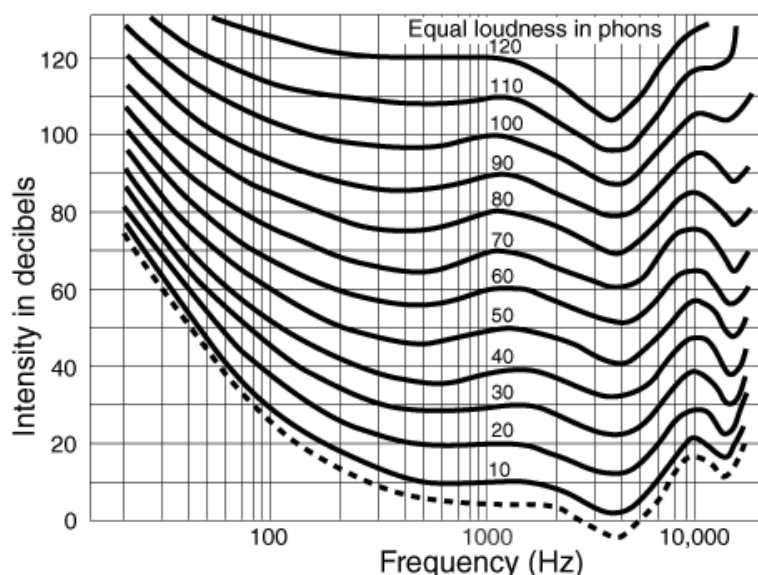
Kaikki yllä esitellyt ilmiöt aiheuttavat viivettä, joka havaitaan yleensä kaikuna, joka usein liitetään suoraan huonoon akustiikkaan. Ensimmäinen kuultava ääni tulee suoraan äänen lähteestä. Seuraavaksi kuultava ääni on lattian, seinien ja katon kautta heijastuva ensiheijastus, jolla on suuri vaikutus tilavaikutelmalle. Viimeisenä kuullaan hajaäänet, jotka ovat tilan pintojen heijastuksien monikertoja (kuvio 2). (Koivumäki, 2005.)



KUVIO 2. Ison tilan jälkikaiunta (Koivumäki, 2005)

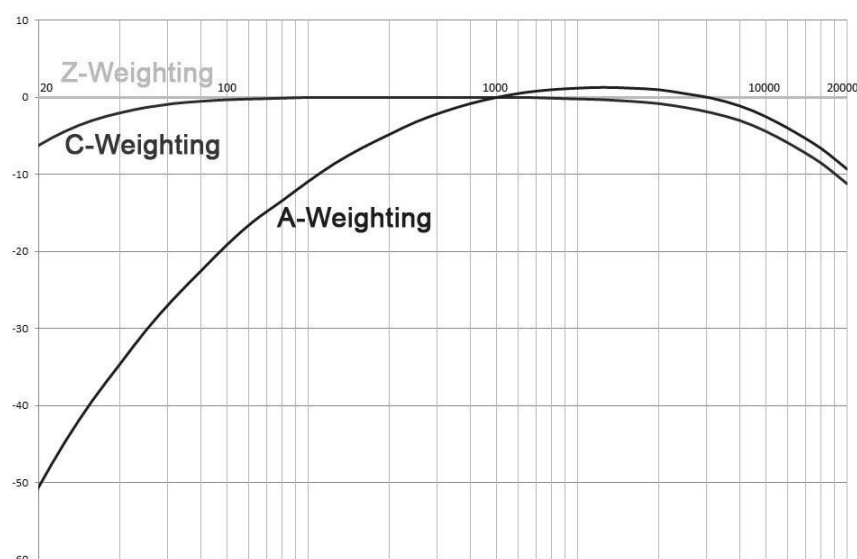
2.3 Akustiikan havainnointi

Ihminen havaitsee suuria intensiteetin muutoksia infra- ja ultraäänitaajuuksien väliltä. Ihmisen kuuloaisti on herkimmillään noin 3500 Hz:n alueella ja nämä taajuudet havaitaan muita ääniä korkeampina korvan anatomian resonanssin vuoksi. Matalat taajuudet kuullaan reilusti heikentyneinä ja äänenpaine erot eivät ole yhtä helposti havaittavissa (kuvio 3). (LOGTaudio, Basics of Hearing n.d..) Taajuuksien välisiä suhteita ovat oktaavi ja terssi. Oktaavi ja terssi kuvaavat kahta eri äänenkorkeutta, niin kuin ihminen sen kuulee. Ihminen kuulee yhden oktaavin eron samana. Oktaavin ero 50 Hz ja 100 Hz kuullaan samana kuin 3 kHz ja 6 kHz ero. (Mitä ääni on?, OR-LOUDSPEAKERS n.d..)



KUVIO 3. Ihmisen kuuloaistin herkkyys (LOGTaudio, Basics of Hearing n.d., muokattu)

Ihmisen kuulokäyrää mallinnetaan mittauksissa käyttämällä A-painotusta, jotta mittaus olisi mahdollisimman todentuntuinen ihmisen näkökulmasta. C-painotus mukailee myös kuuloaistia mutta korkeammilla äänenpainetasoilla, sillä ihmisen kuuloaistin herkkyys vaihtelee äänenpainetason myötä. Z-painoitus on lineaarinen ja vastaa oikeaa äänenpainetta 10 Hz – 20 KHz ($\pm 1,5$ dB) taajuusalueella (kuvio 4). (ATP Instrumentation 2016.) Musiikkia kuunneltaessa akustiikka ei saa olla liian dominoiva, sillä liian paljon akustoitettu tila saattaa kuulostaa epäluonnolliselta ja eleettömältä. Muissa enemmän äänen tarkkailuun suunnatuissa sovelluksissa enemmän akustoitettu tila on parempi.

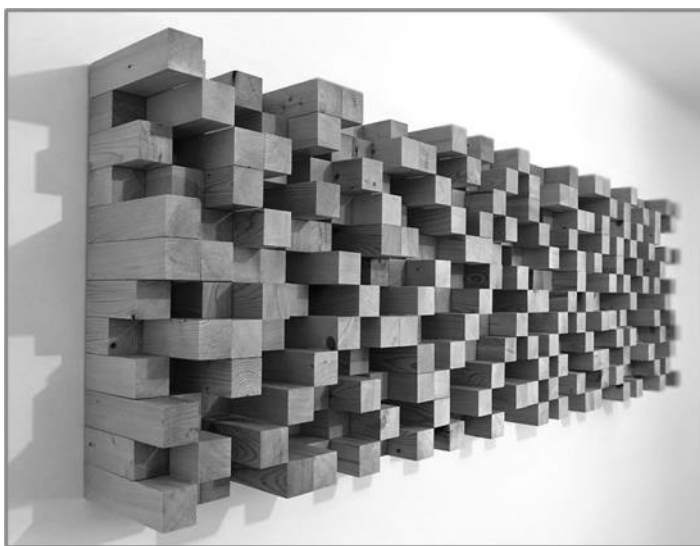


KUVIO 4. Äänen painoituskäyrät (ATP Instrumentation 2016, muokattu)

2.4 Akustoinnin normaalit tavat

2.4.1 Passiivinen

Akustoinnin ensiaskel on tilan pintojen vaihtaminen absorboiviin materiaaleihin, kuten lisäämällä esimerkiksi akustiikkapaneeleita tai huonekaluja. Kaksikanava kuuntelussa tärkein akustiikan kontrollointikeino on ensimmäisen heijastuspinnan absorbointi. Toinen passiivisen akustoinnin tapa on diffuusio, eli äänen hajottaminen diffuusereilla (kuva 1). Diffuuseri hajottaa äänen pienempiin osiin hajääniksi, jotka leviävät ympäri huonetta ilman häiritsevää kaikua. Absorbointi ja diffuusio eivät tehoa hyvin matalille taajuuksille, joten on kehitetty resonanssin absorbointipaneeleja. Paneelit sijoitetaan yleensä tilan nurkkiin pysäyttämään värinän etenemisen rakenteisiin, estäen äänen jakaantumisen koko tilaan.



KUVA 1. Diffuuseri (John Heisz 2017, muokattu)

2.4.2 Digitaalinen huonekorjaus

Digitaalisen huonekorjaimen avulla voidaan parantaa kaiuttimien äänentoistoa huonoissa tiloissa ilman fyysistä akustointia. Huonekorjauksella voidaan ohjelmoida DSP:tä muuntamaan kaiuttimille syötettyä signaalia haluttuun muotoon. Paremman akustiikan saavuttamiseksi kaiuttimesta lähetetään testiääniä kuuntelupaikalla olevalla mikrofonille, joka tallentaa saadun datan DSP:lle. DSP tekee

tarvittavat muutokset, kuten taajuuksien äänenpaineen muutoksia ja viive-eroja. Kaiuttimet tuottavat uuden äänen, joka kuuntelupisteessä kuulostaa luonnollisemmalta ja teoriassa omistaa tasaisen taajuuskäyrän.

Huonekorjauksessa mittaus tehdään Z-painoituksella, joka ei vastaa ihmisen kuuloaistia. Äänen luonnollisuutta pyritään parantamaan käyttämällä eri tyylistä kalibrointi-painoitusta, jonka taajuuskäyrä nousee matalilla taajuuksilla ja laskee korkeammilla. Joskus kalibrointi saa todellisen kaiuttimien lähettämän taajuusvasteen tuottamaan epäluonnollisia amplitudipiikkejä, jotka ihminen havaitsee eri tavalla kuin mikrofoni. Vaikka kaiuttimet saataisiin kuulostamaan luonnollisilta, huonekorjauksella ei välttämättä saada edellä mainitusta syystä suurta muutosta ilman kuultavia häiriöitä.

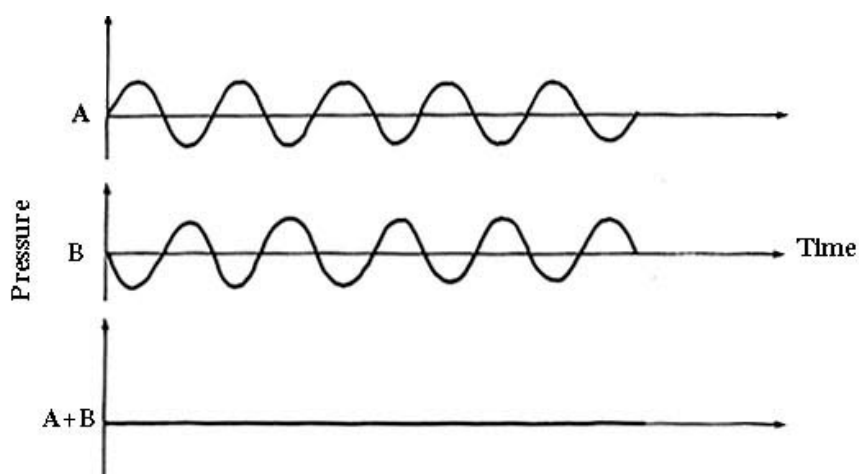
Huonekorjauksella ei voida myöskään suodattaa suurimpia vääristymiä, esimerkiksi jos kuuntelupisteeseen kohdalle muodostuu seisovan aallon solmukohta. Vaimennuksen ollessa tarpeeksi suuri, huonekorjauksella ei voida lisätä kyseisen taajuuden amplitudia. Amplitudia nostettaessa on laskettava koko taajuuskaistan amplitudia saman verran, jotta vahvistimeen mentävä sisäänmenosignaali ei kasva liian suureksi. Taajuuskaistan amplitudia laskettaessa siis menetetään äänenpainetta. Sisäänmenon kasvaessa liian suureksi vahvistin vahvistaa signaalia liian paljon vahvistimen sietorajakykyyn verrattuna ja täten signaali leikkaantuu aiheuttaen muun muassa säröä.

3 AKTIIVINEN VASTAMELUTEKNIikka

3.1 Teoria

Aktiivinen vastamelu on destruktiivisen interferenssin hyödyntämistä epätoivotun äänen supistamiseksi, joka yleensä tapahtuu mikrofoniin ja DSP-tekniikan avulla. Vastamelutekniikka ei käytä seisovaa aaltoa hyödyksi, vaikka molemmissa tapauksissa voidaan havaita destruktiivisen interferenssi. Seisova aalto syntyy kahden kohtisuoran kovan pinnan välille, kun vastamelutekniikka hyödyntää destruktiivista interferenssiä, joka tapahtuu ilmassa ennen tilan vaikutusta.

Mikrofonit muuttavat melun digitaalseksi signaaliksi, joka lähetetään digitaaliselle signaaliprosessorille. Signaalin vaihe käännetään 180° ja toistetaan kaiuttimesta käyttäjälle. Signaalin vaiheen kääntäminen teoriassa kumoaa epätoivotun äänen kuvion viisi tapaan.



KUVIO 5. Destruktiivinen interferenssi (Properties of Waves, Interference n.d.)

3.2 Mikrofonien sijoittelu

Mikrofonit voidaan sijoittaa melun lähteen puolelle tai sisäpuolelle tilaa, josta melua halutaan torjua. Ensimmäistä tapaa kutsutaan nimellä "feedforward" ja toista nimellä "feedback" ja näiden yhdistelmää "hybrid active noise cancellation", joka käyttää molempia tapoja melun torjumiseen. "Feedforward" tapa toimii parhaiten

korkeita ääniä vastaan, sillä korkeat taajuudet eivät läpäise materiaa yhtä helposti kuin matalat taajuudet. "Feedback" tapa toimii paremmin matalia taajuuksia vastaan, kun ne torjutaan juuri kun ne on kuultu. Tämä tosin voi lisätä viivettä, sillä korjaus pitää tehdä, kun melu on kulkeutunut tilaan, jossa käyttäjä on kuullut melun samaan aikaan mikrofonin kanssa. Hybridi-tapa tuo aikaisemmista tavoista esiin parhaat puolet, mutta on kaksin kerroin kalliimpi ja vaikeampi toteuttaa. (The three types of active noise cancellation, Jabra n.d..)

3.3 Käyttökohteet

Näkyvin vastamelun käyttökohde on vastamelukuulokkeet, jotka ovat nostattaneet suosiotaan viime aikoina, vaikka idea on jo lähes 90 vuotta vanha. Vastamelukuulokkeissa käytetään usein "feedforward" tapaa, sillä se on kustannustehokas tapa kumota suurin osa melusta. Kuulokemikrofonit taas hyödyntävät vastamelutekniikkaa mikrofonin äänenlaadun parantamiseen ja häiriöiden minimoimiseen. Ideaa on käytetty pitkään ilmailussa kommunikoinnin parantamiseksi. (The three types of active noise cancellation, Jabra n.d..)

Melua voidaan suodattaa myös kaiuttimilla mutta se ei ole yhtä tehokasta, kun tilassa on useampi ihminen. Jokainen havainnoi äänen eri tavoin sijainnin ja akustiikan tuomien väritymien ja viiveiden myötä. Kaiuttimilla voidaan kuitenkin torjua tasaista matalataajuisia ääntä ja vähentää työympäristön meluhaittaa (Hansen 2005). Parhaimmat tulokset saadaan pienissä tiloissa, joissa ääni on tasaista. Esimerkiksi autossa, jossa moottorin ja renkaiden humina on suunnilleen yhtä voimakas joka puolella autoa. Auton melun hiljentäminen käyttäen vastamelutekniikkaa esiteltiin jo 50-luvulla, mutta sitä ei ole käytetty laajasti. (The three types of active noise cancellation, Jabra n.d..)

Pitkään käytetyt dipolikaiuttimet toistavat saman signaalin kahteen kertaan, toisella kerralla vaiheen ollessa vastakkainen. Tekniikka lisää kaiuttimien suuntaavuutta, joka vähentää huoneen vaikutusta ääneen (DeBoer, C Dipole vs Bipole Speakers: What's the Difference? n.d.). Idea on sama, kuin vastamelussa, mutta täysin passiivinen.

4 KAIUTTIMIEN KÄYTTÖ AKUSTIIKASSA

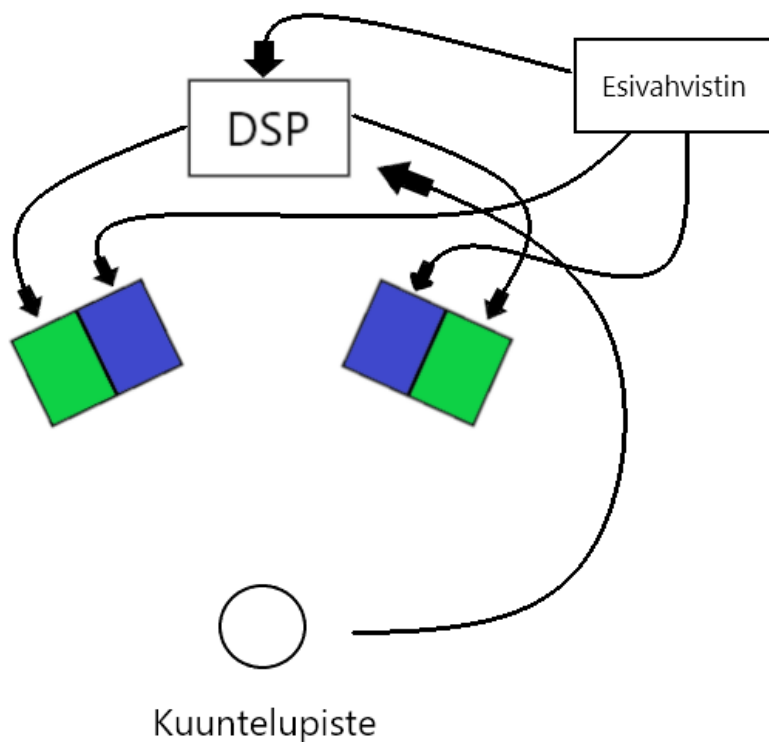
4.1 Idea

Kaiuttimien käyttö vastamelutekniikassa huoneakustiikan parantamiseksi ei ole uusi idea, mutta vähemmän tunnettu. Tekniikkaa voidaan käyttää moneen tarkoitukseen, mutta tässä esimerkissä perehdytään kaksikanavaiseen musiikin tarkkailuun. Esimerkiksi masterointitilaan, jossa hienosäädetään kappaleet julkaisukuntoon. Musiikkia masteroitaessa akustiikan on oltava hyvä, eli kuultavan äänen pitää olla mahdollisimman luonnollinen ja taajuusvasteen tasainen.

Teoriassa akustiikan aiheuttamat korostukset ja vaimennukset saataisiin osittain poistettua, kun erilliset kaiuttimet tuottaisivat pelkästään akustiikan tuomien muutosten ääntä, mutta vaiheen ollessa 180° kuultavaan akustiikan tuomaan ääneen. Akustiikka tosin vaikuttaa myös akustiikkaa torjuviin kaiuttimiin. Molemmat kaiuttimet tulee sijoittaa toisensa välittömään läheisyyteen, jotta akustiikan vaikutus olisi mahdollisimman sama. Tarkoituksena ei ole poistaa taajuuksia vaan tasoittaa niitä. Taajuudet poistuisivat, jos molempien signaalien vaihe olisi 180 astetta toisiinsa nähden ja molempien signaalien amplitudi olisi sama. DSP-ohjattujen kaiuttimien amplitudivastetta pitää laskea tarvittava määrä, jotta superpositioperiaatteen tavoin signaali tasoittuu halutuksi. Vaihe-eroa säätämällä saadaan myös amplitudimuutoksia.

Vaimennukset ja korostumat tallennetaan mikrofonilla, eli kalibroimalla kuuntelupiste. Tallennettavat akustiset ominaisuudet ovat äänenpainetasomuutokset taajuuskaistalla ja mahdolliset äänen vaihemuutokset, jotka viedään DSP:lle. Alkuperäisen äänen signaali viedään myös DSP:lle, jotta oikeat taajuudet voidaan kumota (kuvio 6, jossa vihreät kaiuttimet ovat DSP-ohjattuja ja siniset alkuperäisen äänen säteilijät). Tämä käytäntö ei olisi samalla tavalla aktiivista, kuin aktiivinen vastamelutekniikka yleensä on melun suodatuksessa. Täysin aktiivisessa järjestelmässä mikrofoni olisi koko ajan kytkettynä kuuntelupisteen välittömään läheisyyteen. Täysin aktiivinen järjestelmä mittaisi ja säätäisi järjestelmän parametreja, jos taajuusvaste ei olisi tahdotun muotoinen.

Tekniikka soveltuu vain yhden henkilön käytettäväksi, sillä kaiuttimien tuottamat korjaussignaalit toimivat vain yhdessä pisteessä. Jos käyttäjä ei pysy samassa pisteessä, mihin järjestelmä on kalibroitu, kaiuttimet vahvistavat tai vaimentavat vääriä alueita muuttuneen akustisen profiilin takia.



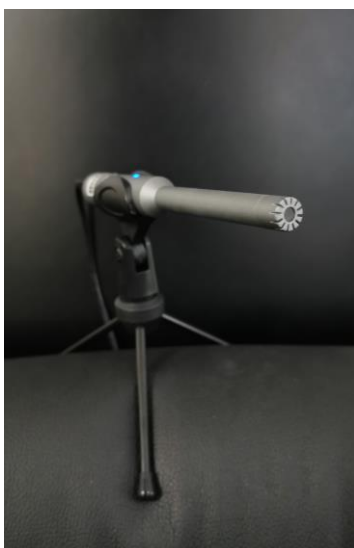
KUVIO 6. Havainnekuva kytkennästä

Aktiivisessa vastamelutekniikassa matalien taajuuksien suodattaminen on todettu toimivammaksi kuin korkeampien, sillä matalien taajuuksien aallonpituudet ovat suurempia, joka helpottaa DSP:n toimintaa ja vaihe-eroja ei pääse syntymään. (Kjeldsen, M. n.d..)

4.2 Käytännön kokeilu

Ideaa testataan ilman DSP:tä kahdella kaiuttimella, esivahvistimella ja päätevahvistimella. Mittauksissa käytetään kuvion kuusi mukaista järjestelyä, mutta vihreille kaiuttimille menevän kaiutinjohtoon napaisuus on käännetty, 180 asteen vaiheen saavuttamiseksi. Kaiuttimet ovat toistensa välittömässä läheisyydessä ja

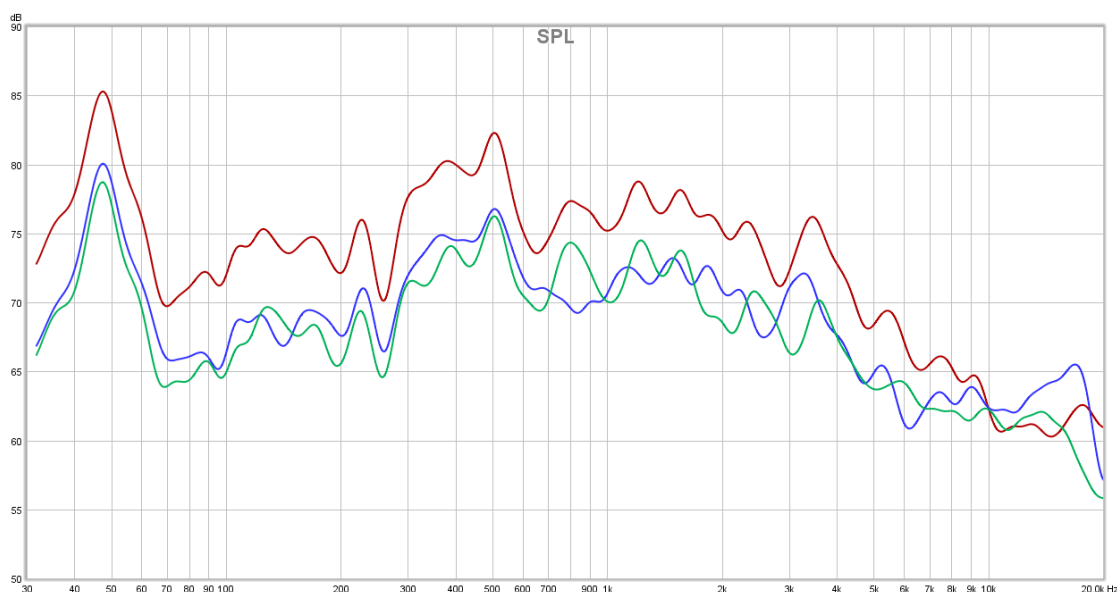
niistä toistetaan samaa sinisignaalia 30 Hz – 20 kHz taajuusalueelta, jotka mitataan käyttäen kalibroitua MINIDSP UMIK-1 mittamikrofonia (kuva 2) ja Room Acoustics Software (REW) -sovellusta. Kaiuttimien perusarvot mitataan, jotta voidaan verrata mihin vaiheen kääntö vaikuttaa. Kaiuttimet (kuva 3) ovat 235 cm:n etäisyydellä mittamikrofonista ja 60 cm:n etäisyydellä lähimmästä seinästä. Kaiuttimet on kohdistettu pienellä kulmalla kohti mikrofonia viiveiden minimoimiseksi. Mittaus on suoritettu tavallisessa olohuoneessa (n. 90 m³), jota ei ole erikseen akustoitettu. Mikrofoni on sijoitettu sohvalle kuuntelupisteeseen ja kaiuttimet toistensa viereen vasemman kanavan kohdalle. Mittauksessa käytetään oktaavin kuudesosaa taajuusvasteiden tasoittamiseksi. 1/6 tasoitus mukailee ihmisen kuuloaistin herkkyyttä ja tasoittaa äänenpaine-eroja taajuusasteikolla.



KUVA 2. MINIDSP UMIK-1 mittamikrofoni



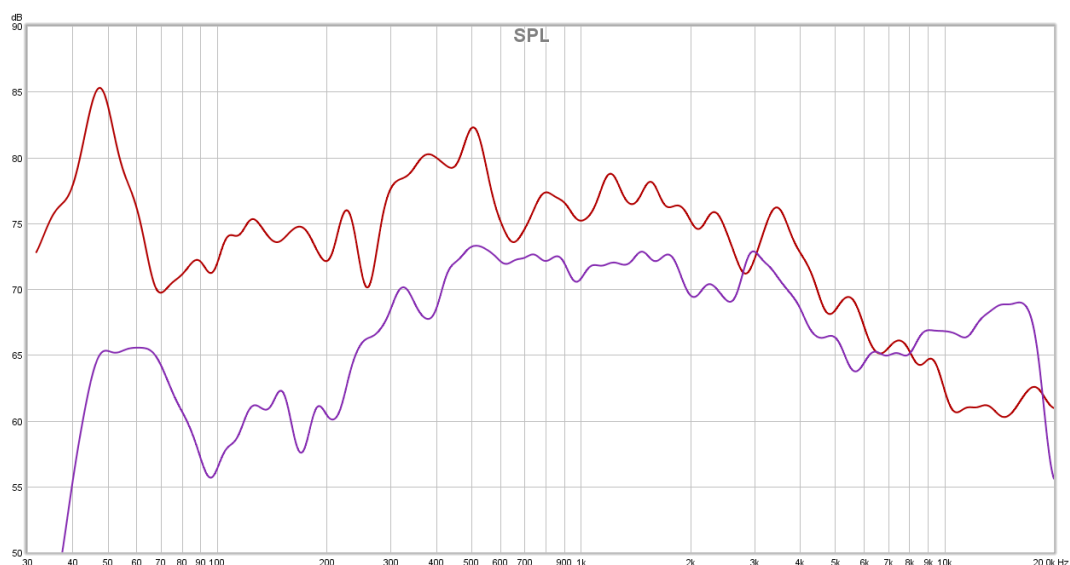
KUVA 3. Mittaustilanne



KUVIO 7. Kaiuttimien taajuusvaste, jossa sininen on normaalin signaalin vaste, vihreä on tulevan säädetyn kaiuttimen vaste ja punainen näiden yhdistelmä. Liitteenä suurempikokoinen kuvio

Kaiuttimet omistavat suhteellisen saman muotoisen taajuusvasteen (kuvio 7). Suurin äänenpaine-ero on noin 5 dB, joka on riittävän hyvä testiä varten. Kaikissa vasteissa näkyy 47 Hz:n kohdalla suuri piikki, joka todennäköisesti johtuu huoneen konstruktivisesta interferenssistä, eli heijastuksista ja mahdollisesta seisovan aallon kupukohdasta. Lisäksi kaiuttimia ei ole suunniteltu toistamaan alle 50 Hz:n, joten vääristymiä saattaa syntyä sitäkin kautta särön kasvaessa.

Seuraavaksi mitataan taajuusvaste molempien kaiuttimien ollessa päällä, mutta vihreän kaiuttimen vaste käännettynä 180 astetta siniseen nähden. Mittauksissa on taas käytetty 1/6 tasoitusta. Kuviosta kahdeksan nähdään miten vaiheen kääntäminen toisesta kaiuttimesta vaikuttaa etenkin mataliin taajuuksiin ja pienentää selvästi huoneen aiheuttamaa korostusta 47 Hz:n tuntumassa. Testi näyttää toimivan aina 3 kHz:n asti, mutta toimivan parhaiten alle 250 Hz:n. Korkeampien taajuuksien käyttäytyminen johtuu pienistä viive-eroista. Korkeilla taajuuksilla on lyhyemmät jaksonpituudet, josta helposti aiheutuu vaihe-eroja. Testin perusteella idea saattaa toimia hyvinkin subwoofereille ja pääkaiuttimillekin pieniin, muutaman desibelin, säätöihin.



KUVIO 8. 180 asteen käännön mittausta, jossa punainen käyrä on normaali ja violetti käyrä 180 asteen vaihe-erolla. Liitteenä suurempikokoinen kuvio

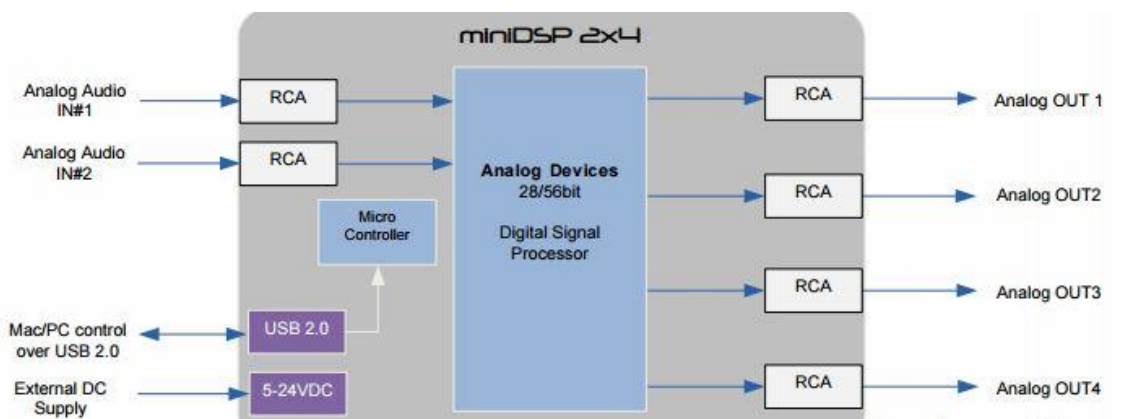
4.3 MiniDSP 2x4:n käyttö aktiivisena vastamelu prosessorina

MiniDSP 2x4 (kuva 4) on taloudellinen työkalu yksinkertaiseen huonekorjaukseen ja suodattimien käyttöön. Taajuusvaste mitataan kalibroidulla mikrofonilla, jonka data lähetetään tietokoneelle, jossa REW-ohjelma tekee halutut muutokset, eli amplituditason suodattimet, huonekorjausta varten. MiniDSP kytketään tietokoneeseen ja data siirretään laitteelle. DSP kytketään esivahvistimen ja päätevahvistimen tai aktiivikaiuttimien väliin RCA-johdoin. (miniDSP 2019.)



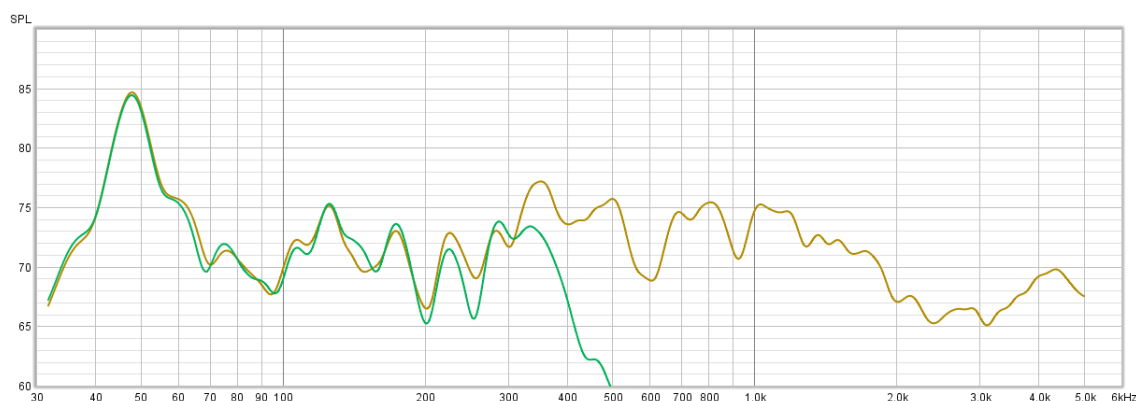
KUVA 4. MiniDSP 2x4 (miniDSP 2019, muokattu)

DSP:ssä (kuvio 9) on kaksi analogista sisääntuloa ja neljä analogista ulostuloa. Sisäänmenoihin kytketään vasen ja oikea kanava, ulostuloihin normaalit kanavat. Ulostuloihin kytketään lisäksi 180 asteen viive-erolliset kaiuttimet. DSP:stä voidaan säätää kaiuttimien viiveitä ja amplitudeja taajuusasteikolla.

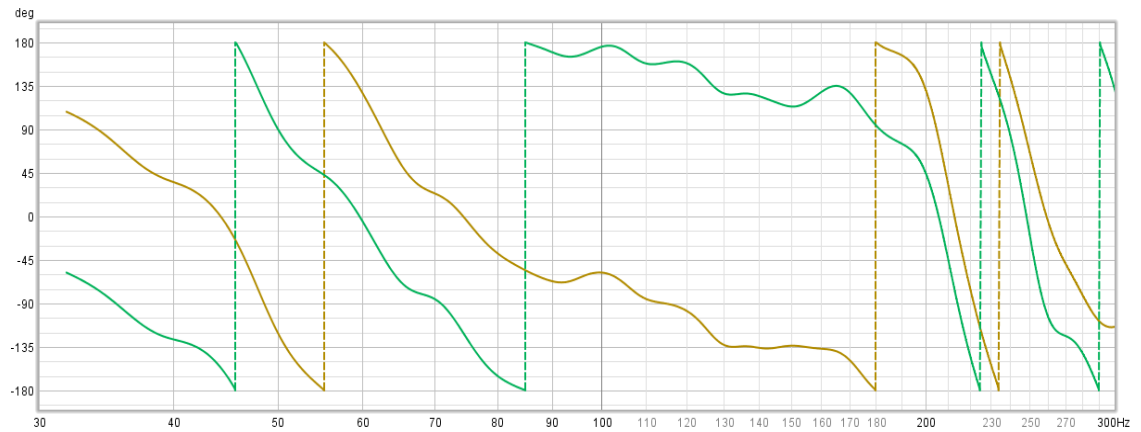


KUVIO 9. MiniDSP:n järjestelmä (miniDSP 2019)

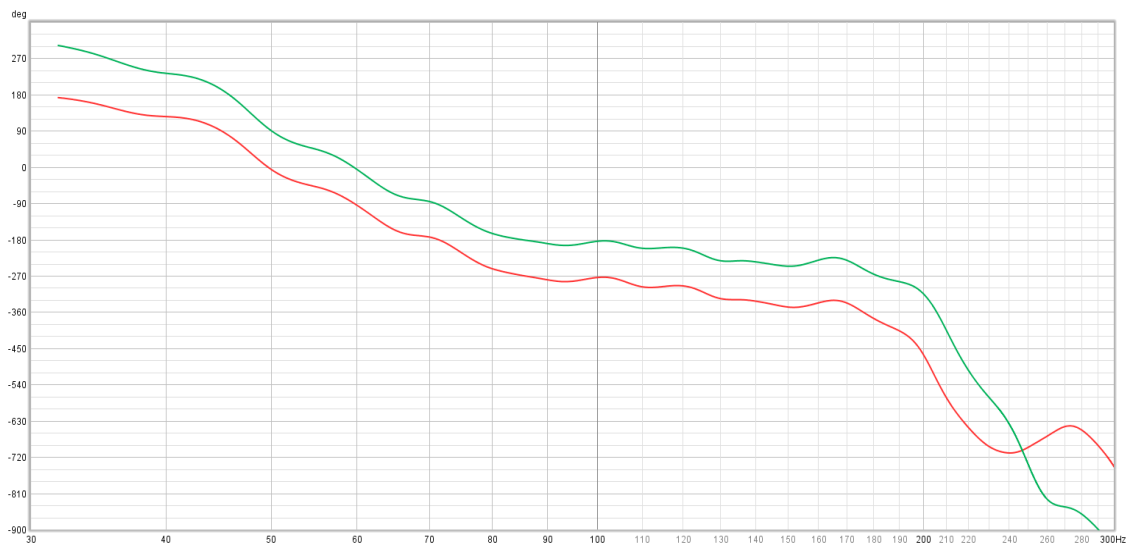
Kaiuttimet sijoitetaan samaan kohtaan kuin aikaisemmin ja mitataan niiden pohja-arvot uudelleen. Mittaus tehdään vain 5 kHz:iin asti, jotta kuvaajista tulisi havainnollisempia. Vaihe-ero tehdään miniDSP:n "invert"-ominaisuudella. Lisäksi vaihe-erolliseen kaiuttimeen laitetaan 400 Hz:n Linkwitz–Riley 24db/oktaavi alapäästösuodin, sekä molempiin 20 Hz:n Linkwitz–Riley 24db/oktaavi ylipäästösuotimet. Taajuus- ja vaihevasteet näkyvät kuvioista 10, 11 ja 12. Kaikissa taajuus- ja vaihevastekuvaajissa käytetään 1/6 oktaavin tasoitusta. Kaikki suotimet tehdään IIR-suotimin, sillä miniDSP 2x4:ssä laskentateho ei riitä parempien FIR-suotimien käyttöön. Kuvioista 10 nähdään, että miniDSP ei vaikuta heikentävästi amplitudi-vasteeseen.



KUVIO 10. Invertoidun ja normaalivaiheisen kaiuttimen taajuusvasteet, jossa vihreä invertoitu ja keltainen normaali



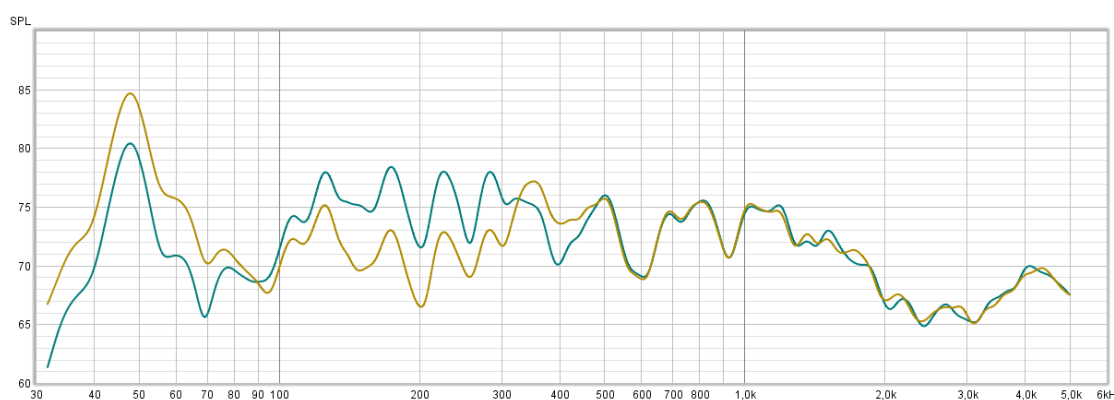
KUVIO 11. Vaihe normaalilla ja invertoidulla kaiuttimella, vihreä invertoitu ja keltainen normaali



KUVIO 12. Vaihevaste (esitetty "unwrapped" muodossa) normaalivaiheisesta oikeasta ja invertoidusta vasemmasta kaiuttimesta

Kuvioista 11 ja 12 tarkastelemalla nähdään, että signaalien todellinen vaihe-ero on yleensä vain 90 astetta, mikä tarkoittaa sitä, että haluttua vaihe-eroa ei ole tapahtunut. Tämä johtuu todennäköisimmin IIR-suotimissa tapahtuvasta vaihesiirrosta ja viiveistä. 90 asteen vaihe-ero saadaan 180 asteen vaihe-eroksi lisäämällä viivettä 0,25 ms:a normaaliin kaiuttimeen. Tällöin tosin koko matalien taajuuksien taajuusalue vaimentuisi liikaa, sillä 90 asteen vaihe-ero on sama aina 200 Hz:iin asti. Haluttuun tulokseen tarvitaan FIR-suotimia, joita tarkastellaan seuraavassa luvussa.

Kuviosta 13 nähdään, että huonemoodi on pienentynyt lähes 5 dB:ä ja 100 Hz – 300 Hz välillä ollut vaimentuma on poissa. Sen jälkeen alipäästösuodin alkaa vaikuttamaan ja täten muutoksia yli 500 Hz:n ei ole. 70 Hz:iin on muodostunut ylimääräinen vaimentuma. Tulos ei ole kovin hyvä, vaikka se onkin hieman parempi normaaliin verrattuna. Saman tai paremman tuloksen olisi saanut tavallisella huonekorjauksella. Tulokseen vaikuttaa myös tuplaantunut elementtien pinta-ala, eli signaalien summautuminen eli interferenssi. Vertaus tehdään kahden kaiuttimen sijaan yhteen, sillä näin toimittaisiin normaalisti kahden kaiuttimen stereo kuuntelussa. Lisäksi kuultava amplitudivaste on käytännössä tasaisempi, kun käytetään vasenta ja oikeaa kanavaa, joissa molemmissa on kaksi kaiutinta.

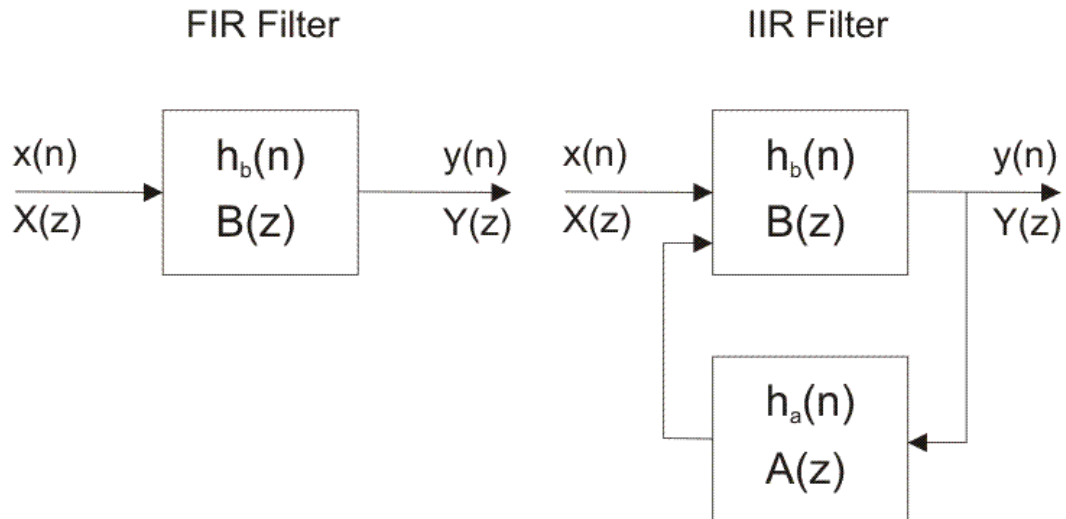


KUVIO 13. Keltaisella normaali taajuusvaste miniDSP:n kautta ja sinertävällä yhdistelmä invertoidusta ja normaalista. Liitteenä suurempikokoinen kuva

4.4 FIR ja IIR -suotimet

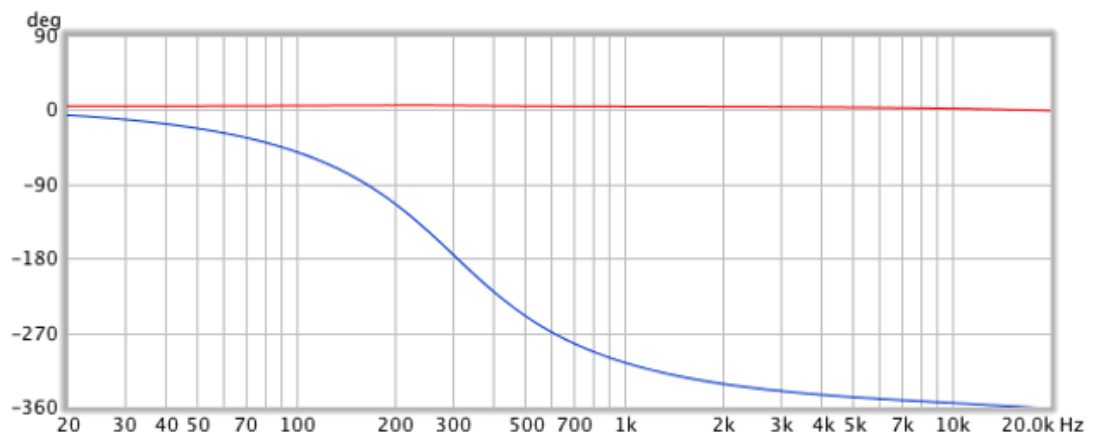
Digitaalinen FIR-suodin voi olla vaiheilineaarinen, toisin kuin IIR-suodin. Viive ei siis muutu taajuuden mukaan, vaan on lineaarinen koko suodattimen taajuusalueella. Tämän takia FIR-suodinta voidaan hyödyntää IIR-suodinta paremmin sovelluksissa, joissa vaiheella on iso merkitys. IIR-suodin käyttää takaisinkytkentää, eli se on rekursiivinen suodin, toisin kuin FIR-suodin (kuvio 14). Takaisinkytkentä pienentää tarvittavan laskentatehon määrää mutta lisää virheitä. Jos ensimmäisellä läpimenolla aiheutuu pieni virhe, se monikertaistuu takaisinkytkennän takia. FIR-suotimella tarvitaan suurempaa laskentatehoa kuin IIR-suotimella, mutta se omistaa paremman virheensietokyvyn. IIR-suotimet ovat nopeita ja suotimien ai-

heuttama viive on suhteellisen pieni. FIR-suotimilla viive riippuu ”tapsien” määrästä. Matalien taajuuksien terävät suotimet aiheuttavat suurimmat viiveet laskentatehon kasvaessa. (Introduction to Filters: FIR versus IIR 2020.)



KUVIO 14. FIR ja IIR kytkentätavat (MikroElektronika 2020)

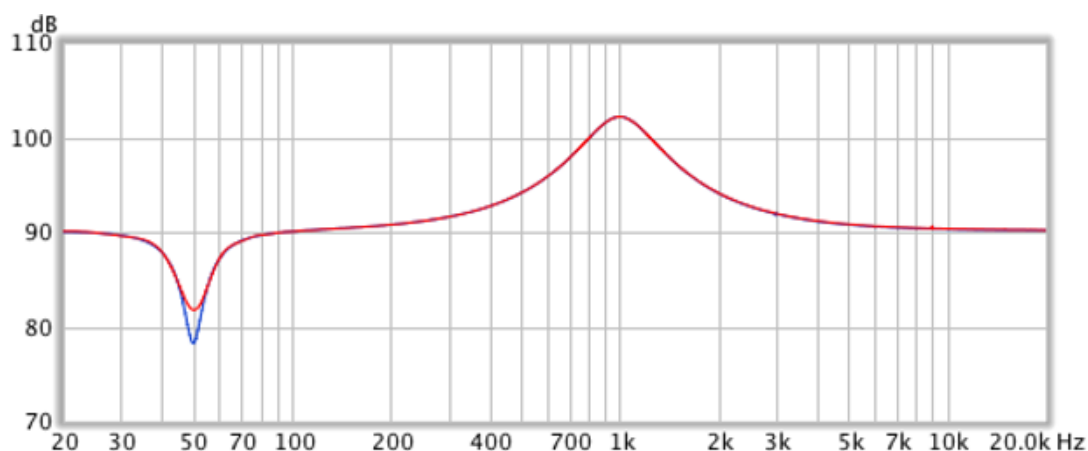
Kuviosta 15 nähdään esimerkki FIR-suotimen lineaarisesta ja IIR-suotimen epälineaarisesta vaihevasteesta, kun käytetään alipäästösuodatinta. Vastaava vaihemuutos estää vastamelutekniikan optimaalisen toiminnan ilman monimutkaisia algoritmeja, jotka on usein tarkoitettu aktiivisiin sovelluksiin.



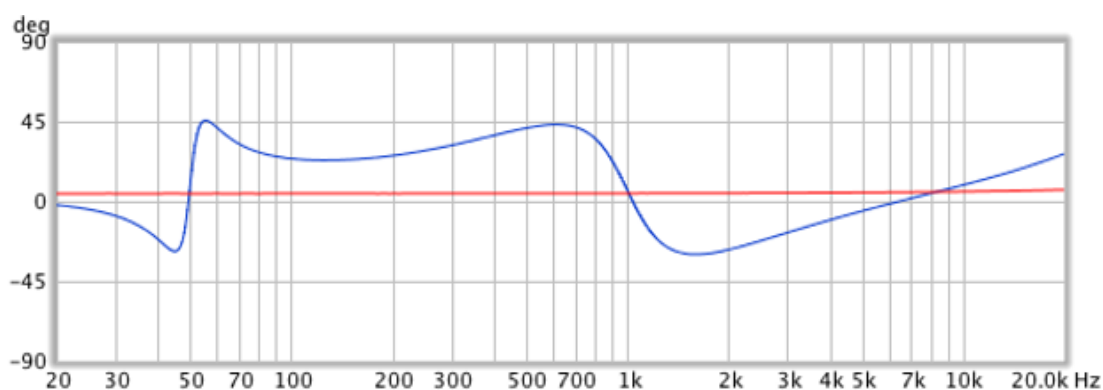
KUVIO 15. IIR ja FIR suodattimet, 300Hz:n LR24dB/oktaavi alipäästösuodatin, sininen IIR ja punainen FIR (FIR vs IIR filtering, miniDSP 2019)

Kuviosta 16 voidaan tarkastella parametristen suodattimien amplitudivasteiden eroa. IIR-suotimilla voidaan saavuttaa helpommin suurempia Q-arvoja, joilla saadaan kapeampia suotimia taajuuskäyrälle kuin FIR-suodattimilla, joilla vastaava

tarkkuus vaatisi huomattavan paljon laskentatehoa. Saman parametrinen suodattimien vaihevaste on kuviosta 17, josta nähdään, että vaihevaste muuttuu radikaalisti suodattimen taajuuskaistalla.



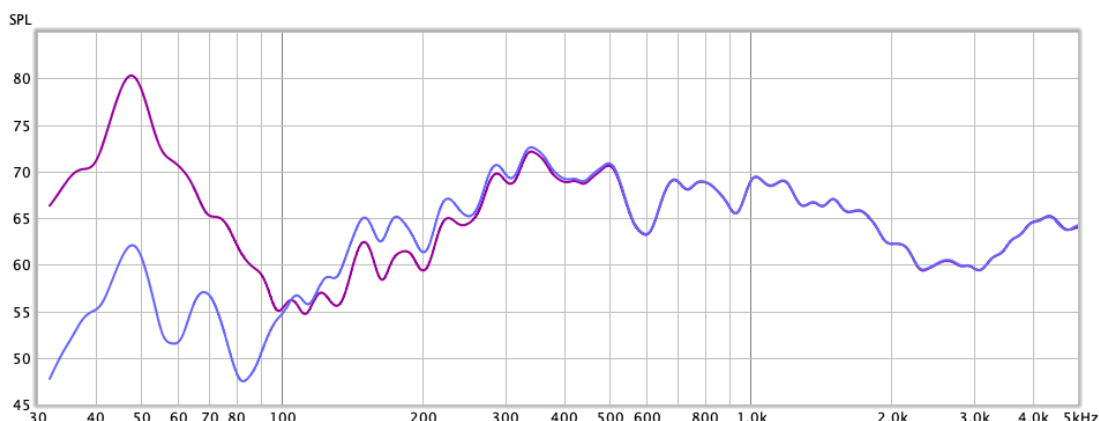
KUVIO 16. Parametrinen suotimien amplitudivaste, sininen IIR ja punainen FIR (FIR vs IIR filtering, miniDSP 2019)



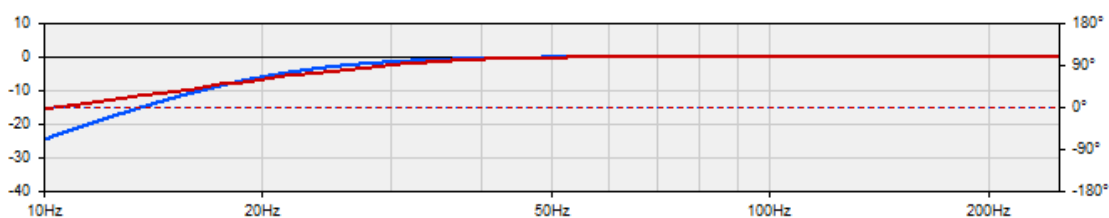
KUVIO 17. Parametrinen suotimen vaihesiirto, sininen IIR ja punainen FIR (FIR vs IIR filtering, miniDSP 2019)

Kuviossa 18 on mitattu IIR-suotimien vaikutusta amplitudivasteeseen. Mittauksessa käytetään 20 Hz:n LR 24dB/oktaavi ylipäästösuo-dinta, joka ei pitäisi vaikuttaa amplitudiin alle 40 Hz:n. Kuvasta voidaan huomata, että suodin aiheuttaa vaihesiirtoa, jonka vuoksi haluttua vaihe-eroa ei saavuteta, ja äänenpainetasot nousevat normaalille tasolle. Kuviosta 19 nähdään rePhase-ohjelmalla luotu FIR-suotimen teoreettinen tulos amplitudi ja vaihevasteelle. Simulointiin käytetään 4000 "tapsia" eli noin 250 euron DSP-laitteen kaikki teoreettinen laskentateho. Käyrästä nähdään, että laskentateho ei riitä täydellisen ylipäästösuo-timen tekoon mutta tekee tehtävänsä säilyttäen lineaarisen vaiheen. Suotimen tuoma viive on

noin 45 ms. Jos suotimia on useampia, saattaa viive FIR-suotimilla kasvaa liian suureksi käyttökohteen mukaan.



KUVIO 18. Ylipäästösuotimien vaikutus taajuusvasteeseen käyttäen IIR suotimia, violetissa vain toisessa kaiuttimessa suodin ja sinisessä molemmissa



KUVIO 19. FIR-suotimella luotu ylipäästösuodin (20 Hz:n LR 24dB/oktaavi, hann ikkunointi), jossa sinen viiva haluttu amplitudivaste ja punainen tavoitettu vaste, sekä vaihevaste punaisella katkoviivalla

4.5 Tulosten vertailu

MiniDSP:llä idea saatiin toimimaan, mutta järkevään ratkaisuun kyseisellä laitteella ei päästy. Halvimman, noin sadan euron, miniDSP mallin IIR-suotimet aiheuttivat vaiheensiirron takia ongelmia, jotka olisi voitu ratkaista tehokkaalla DSP:llä. DSP:n pitäisi olla riittävän tehokas, jotta laskentateho riittäisi tarkkoihin vaihe ja amplitudimuutoksiin. Laitteen hinta nousee tuhansiin euroihin, jos ongelmat haluaa korjata isommalta taajuusalueelta, joten tätä menetelmää ei kokeiltu. FIR-suotimia käyttämällä olisi saatu tehtyä sopivia vaihemuutoksia haluttuihin taajuuksiin joihin huone vaikuttaa. Esimerkiksi 47 Hz:n huonemoodi olisi saatu pois FIR-suotimien vaihemuokkauksella, luomalla 47 Hz:n kohdalle 270–90 asteen vaihe-ero.

5 POHDINTA

Aktiivisessa vastamelutekniikassa käytetään yleensä FIR-suotimia niiden paremman stabiilisuuden ja vaihelineaarisuuden takia. Lisäksi niihin on lisätty tarkoitukseen tehtyjä algoritmeja, jotka parantavat tulosta entisestään. Huoneakustiikan väritymien poistaminen vastamelutekniikalla osoittautui hyvin erilaiseksi ja haastavaksi. Normaalisti aktiivisessa melun hallinnassa käytetään mikrofoneja aktiivisesti suodattamaan epätoivotut häiriöt. Kehitetyt algoritmit ovat tehty näihin tarkoituksiin, eivätkä ne sovellu huonemoodien suodatukseen. Ideaa ei ole kehitetty tarpeeksi, jotta tarvittavaa tietoa tai tapoja luoda kumoavia ääniaaltoja akustiikan parissa voisi hyödyntää.

Tällaisenaan miniDSP 2x4-laitteen kanssa toteutettu ratkaisu ei ole taloudellisesti tai äänellisesti oikea ratkaisu poistaa huonemoodeja. Tehokkaimmilla DSP-laitteilla saataisiin varmasti parempaa jälkeä, mutta parempia ratkaisuja löytyy jo markkinoilta, kuten digitaaliset huonekorjaimet. Huonekorjaimet tosin eivät hyödynnä destruktiivista interferenssiä. Tähän opinnäytetyön ideaa voisi käyttää ja soveltaa sopivaksi huonekorjainten käyttöön. Tällä hetkellä huonekorjaimet eivät pysty täysin korjaamaan seisovien aaltojen aiheuttamia vaimennuksia, joita voitaisiin hallita paremmin taajuuksien mitätöinnillä.

Varta vasten suunnitellut kaiuttimet, joissa olisi bassoelementtejä kaksi kertaa enemmän normaaliin verrattuna, olisivat varmasti paras ratkaisu. Elementin akustinen profiili ja diskantin toisto pysyisi samana. Menetelmää ollaan hyödynnetty passiivisesti jo pitkään dipolikaiuttimissa, joissa elementit on sijoitettu esimerkiksi etu ja takapuolelle. Ideaa voisi kehittää edelleen DSP-ohjattuun laitteistoon, yhdessä huonekorjainten kanssa.

LÄHTEET

Korpela, J. 2017. Äänenpaine ja äänenpainetaso. Luettu 22.1.2020. <http://jkor-pela.fi/yksikot/15.5.html>

Nave, R. n.d. Standing Waves. Luettu 4.3.2020. <http://230nsc1.phy-astr.gsu.edu/hbase/Waves/standw.html>

OR-LOUDSPEAKERS. n.d.. Mitä ääni on?. Luettu 3.3.2020. <http://kaiutti-met.fi/fi/tuki/mita-aani-on>

Lets Learn Nepal. n.d. Principle of Superposition of Wave. Kuvio 1, superposi-tioperiaate. Luettu 23.2.2020. <http://letslearnnepal.com/class-12/physics/wave-and-optics/wave-motion/principle-of-superposition-of-wave/>

Koivumäki, A. 2005. Äänen kuuleminen tilassa. Luettu 23.2.2020. http://www.aanipaa.tamk.fi/tila_2.htm

Koivumäki, A. 2005. Äänen kuuleminen tilassa. Kuva 2, Ison tilan jälkikaiunta. Luettu 23.2.2020. http://www.aanipaa.tamk.fi/tila_2.htm

LOGTaudio. n.d. Basics of Hearing. Kuvio 3, Ihmisen kuuloaistin herkkyys. Luettu 23.2.2020. http://www.logtaudio.nl/audio_perception/hearing_and_audiology.htm

LOGTaudio. n.d. Basics of Hearing. Luettu 23.2.2020. http://www.logtau-dio.nl/audio_perception/hearing_and_audiology.htm

ATP Instrumentation. 2016. A, C & Z FREQUENCY WEIGHTINGS EXPLAINED. Kuvio 4, Äänen painoituskäyrät. Luettu 23.2.2020. <https://www.atp-instrumentation.co.uk/blog/frequency-weightings-explained/>

Heisz, J. 2017. Kuva 1, Diffuuseri. Luettu 10.3.2020. <https://ibuildit.ca/projects/skyline-diffuser-wall-art/>

Properties of Waves. n.d. Interference. Kuvio 5, Destruktiivinen interferenssi. Luettu 20.2.2020. <https://sites.google.com/site/propertiesofwavesph3u/home/interference>

Kjeldsen, M. n.d. Active noise cancellation. Luettu 22.5.2020. <https://owolff.com/acoustics/design-support/active-noise-cancellation>

Hansen, C. 2005. Current and future industrial applications of active noise control. Luettu 11.2.2020. https://www.researchgate.net/publication/228361126_Current_and_future_industrial_applications_of_active_noise_control

Jabra. n.d. The three types of active noise cancellation. Luettu 11.2.2020. <https://www.jabra.com/blog/anc-headsets-arent-all-the-same-three-types-of-anc/>

DeBoer, C. n.d. Dipole vs Bipole Speakers: What's the Difference?. Luettu 22.4.2020. <http://www.audiogurus.com/learn/speakers/difference-between-dipole-bipole-speakers/290>

miniDSP. 2019. miniDSP 2x4. Luettu 4.4.2020. <https://www.minidsp.com/products/minidsp-in-a-box/minidsp-2x4>

miniDSP. 2019. miniDSP 2x4. Kuva 4, MiniDSP 2x4. Luettu 4.4.2020. <https://www.minidsp.com/products/minidsp-in-a-box/minidsp-2x4>

miniDSP. 2019. miniDSP 2x4. Kuvio 9, MiniDSP:n järjestelmä. Luettu 4.4.2020. <https://www.minidsp.com/products/minidsp-in-a-box/minidsp-2x4>

Siemens. 2020. Introduction to Filters: FIR versus IIR. Luettu 20.4.2020. <https://community.sw.siemens.com/s/article/introduction-to-filters-fir-versus-iir>

MikroElektronika. 2020. Digital Filter Design. Kuvio 14, FIR ja IIR kytkentätavat. Luettu 21.4.2020. <https://www.mikroe.com/ebooks/digital-filter-design/introduction-iir-filter>

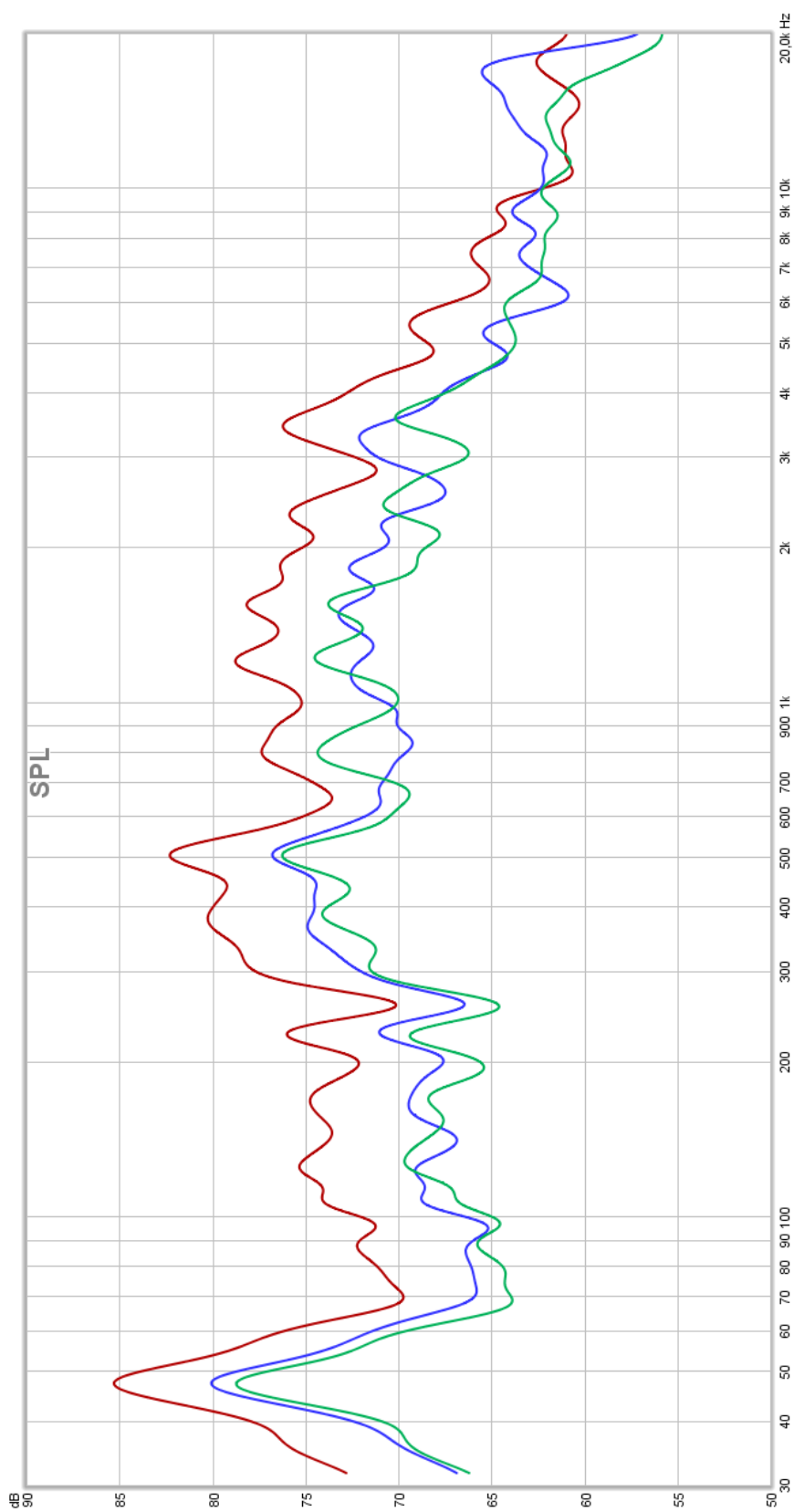
miniDSP. 2019. FIR vs IIR filtering. Kuvio 15, IIR ja FIR suodattimet, 300Hz LR24dB/oktaavi alipäästösuodatin, sininen IIR ja punainen FIR. Luettu 2.4.2020. <https://www.minidsp.com/applications/dsp-basics/fir-vs-iir-filtering>

miniDSP. 2019. FIR vs IIR filtering. Kuvio 16, Parametrinen suotimen amplitudivaste, sininen IIR ja punainen FIR. Luettu 2.4.2020. <https://www.minidsp.com/applications/dsp-basics/fir-vs-iir-filtering>

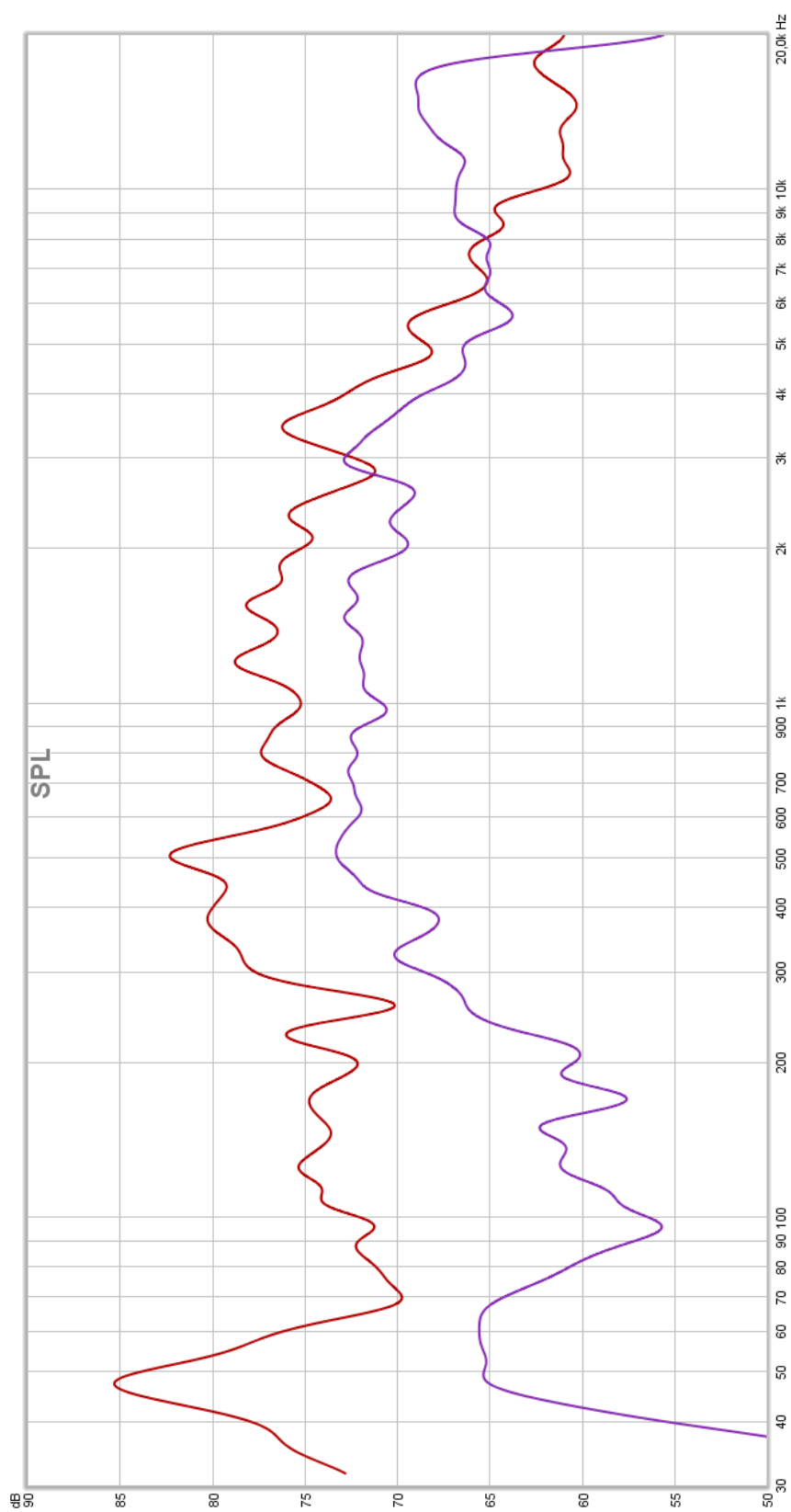
miniDSP. 2019. FIR vs IIR filtering. Kuvio 17, Parametrinen suotimen vaihe siirto, sininen IIR ja punainen FIR. Luettu 2.4.2020. <https://www.minidsp.com/applications/dsp-basics/fir-vs-iir-filtering>

LIITTEET

Liite 1. Kaiuttimien normaalit taajuusvasteet



Liite 2. 180 asteen käännön mittaus



Liite 3. MiniDSP:llä tehty 180 asteen mittaus

